

압력용기용 Cr-Mo강의 수소취화 특성

이휘원* · 양현태** · 김상태†
(2001년 8월 29일 접수, 2002년 3월 6일 심사완료)

The Characteristics of the Hydrogen Embrittlement for the Cr-Mo Steels in Use of Pressure Vessel

Hwi-Won Lee, Hyun-Tae Yang and Sang-Tae Kim

Key Words: Hydrogen Embrittlement(수소취성), Cathodic Electrolytic Method(음극전기분해법), Strain Rate(변형률속도), Diffusion Coefficient(확산계수), Notch Sensitivity(노치민감도)

Abstract

This study presents the hydrogen embrittlement in the metal, which decreases the ductility and then induces the brittle fracture. The contribution deals with the effect of strain rate and notch geometry on hydrogen embrittlement of 1.25Cr-0.5Mo and 2.25Cr-1Mo steels, which are in use at high pressure vessel. Smooth and notched specimens were examined to obtain the elongation and tensile strength. For charging the hydrogen in the metal, the cathodic electrolytic method was used. In this process, current density is maintained constant. The amount of hydrogen penetrated in the specimen was detected by the hydrogen determinator(LECO RH404) with the various charging time. The distribution of hydrogen concentration penetrated in the specimen was obtained by finite element analysis. The amount of hydrogen is high in smooth specimen and tends to concentrate in the vicinity of surface. The elongation and tensile strength decreased with the passage of charging time in 1.25Cr-0.5Mo and 2.25Cr-1Mo steels. The elongation increased and tensile strength decreased as strain rate increased. As a result of this study, it is supposed that 1.25Cr-0.5Mo steel is more sensitive than 2.25Cr-1Mo steel in hydrogen embrittlement. Hydrogen embrittlement susceptibility of notched specimen after hydrogen charging is more remarkable than that of smooth specimen.

1. 서 론

금속재료의 기계적 성질에 영향을 주는 환경물질 중에서 가장 지배적인 것이 수소로 알려져 있다. 수소발생분위기에서 장기간 사용되는 석유화학 설비 등의 압력용기에 대한 안전성과 수명평가는 주로 수소취성(hydrogen embrittlement), 수소침식(hydrogen blistering), 템퍼취성(temper embrittlement) 등의 관점에서 이루어지고 있다. 특히 이들 설비

에 대한 파손 원인 중에서 수소로 인한 파손이 오래 전부터 산업현장의 문제점으로 부각되었기 때문에 수소취화에 관한 연구^(1~4)가 다양하게 수행되어지고 있다.

부식 분위기에 있는 금속재료의 표면에서는 금속이 용해되는 양극반응과 수소를 생성시키는 음극반응이 있게 된다. 용액 속의 수소이온은 금속의 용해로 생긴 전자들과 결합하여 수소 원자가 되며, 생성된 수소 원자의 일부는 서로 결합하여 수소 분자로 발산되기도 하지만 일부는 재료 속으로 침투해 들어가 재료의 기계적 성질을 변화시켜 파손을 촉진시킨다. 이러한 수소침투로 인한 영향은 균열 촉진의 중요한 기구(mechanism)의 하나가 되며, 음극반응 주도의 현상을 나타내

* 대원과학대학 컴퓨터응용기계설계과

** 영남대학교 대학원 기계공학과

† 책임저자, 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : stkim@yu.ac.kr

TEL : (053)810-2456 FAX : (053)813-3703

는 것이다.

본 연구에서는 압력용기로 널리 사용되는 1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 하여 두 재료 사이에 있어서 수소취화에 대한 민감도를 비교하고, 시험편 내부에 침투된 수소량과 기계적 성질의 상관관계를 고찰하였다. 변형률속도(strain rate)와 노치 크기를 변화시킨 실험적 방법을 통하여 수소취화에 대한 기계적 성질의 특성을 평가하였으며, 유한요소해석에 의하여 수소 침투시간(charging time)의 변화에 따라 시험편 내부로 침투하여 확산된 수소농도를 구하여 그 분포 특성을 고찰하였다.

2. 실험 방법

2.1 재료 및 시험편 형상

본 연구에 사용된 재료는 1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강(ASTM A182)으로서, 고온강도가 높고 수소에 의한 취성효과 저항성이 우수하기 때문에 발전설비의 보일러용과 석유화학설비의 압력용기 등에 널리 사용되고 있다. 이 재료의 화학적 성분은 Table 1 및 2에 나타낸 바와 같다.

인장 시험편의 형상은 환봉(round bar)으로서 ASTM⁽⁵⁾에 의거하여 시험편 길이는 165mm, 지름은 12.5mm, 표점 거리는 62.5mm, 곡률 반경 R=10mm의 형상으로 가공하고 표면을 연마하였다. 노치가 없는 표준 인장 시험편으로 측정된 연성으로는 국부적인 연성 감소를 유발하는 환경 및 급속학적 변화를 잘 설명할 수 없을 경우가 많으며, 노치 부분에서 발생할 수 있는 급격한 응력구배나 3축 응력장으로 인하여 연성이 감소되는

현상인 노치민감도(notch sensitivity)에 관하여 수소취화 특성과 관련하여 평가하는 것이 필요하다. 따라서 본 연구에서는 2.25Cr-1Mo강을 대상으로 노치 끝의 반경이 R=0.025mm, 각도가 60°인 노치를 가진 인장 시험편을 제작하였다. 노치 깊이는 0.403mm(노치가 없는 곳의 단면적과 노치 끝에서의 단면적의 비 : 87.5%), 0.838mm(단면적의 비 : 75%), 1.831mm(단면적의 비 : 50%)의 종류로 하였다.

2.2 수소침투

시험편 표면에서의 수소분자 생성을 억제하든 보다 많은 양의 수소가 재료 내부로 침투되어 수소취화의 영향이 뚜렷해질 것이므로 1N의 H₂SO₄ 용액 속에 소량(200mg/l)의 As₂O₃를 용해시켰다. 백금을 양극으로 하고 시험편을 음극으로 하여 수소를 침투시키는 방법인 음극전기분해법(cathodic electrolytic method)⁽⁶⁾을 이용하였다. 전류밀도가 아주 작을 때는 균열의 생성이 없거나 아주 느리기 때문에⁽⁷⁾ 100(mA/cm²)인 전류밀도로 상온에서 수소를 침투시켰다.

침투된 수소량을 측정하기 위하여 1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강을 판재형상(단면적:3×6mm)으로 제작하여 수소를 침투시킨 후, Hydrogen Determinator(LECO RH404)를 이용하여 측정하였다.

2.3 인장시험

인장시험은 25톤 용량의 만능시험기(Shimadzu사 DCS AG-25TG)를 사용하여 다음과 같은 방법으로 수소취화 영향을 평가하였다.

1) 1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강에 있어서 수소침투로 인한 기계적 성질(연신율, 인장강도)의 변화정도를 평가하여 두 재료 사이의 수소취화에 대한 민감도를 비교한다.

2) 1.25Cr-0.5Mo강에 있어서 변형률속도(strain rate)를 $3.3 \times 10^{-5}[\text{sec}^{-1}]$ 에서 $1.0 \times 10^{-3}[\text{sec}^{-1}]$ 으로 변화시킬 때 수소취화에 있어서 기계적 성질에 미치는 영향을 알아본다.

3) 2.25Cr-1Mo강으로 제작한 노치 인장 시험편을 이용하여 수소취화에 대한 노치민감도를 평가하고, 노치의 크기에 따른 침투 수소량과 기계적 성질의 상관관계를 고찰한다.

4) 각각의 재료마다 수소 침투시간의 증가에

Table 1 Chemical compositions of 1.25Cr-0.5Mo steel and 2.25Cr-1Mo steel(wt. %)

■ 1.25Cr-0.5Mo Steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.16	0.81	0.64	0.022	0.009	1.31	0.56	Bal.

■ 2.25Cr- 1Mo steel

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.12	0.26	0.44	0.021	0.012	2.09	0.97	Bal.

다른 기계적 성질의 변화를 알아본다. 실제로 수소 침투가 가능한 환경에서 장시간 사용될 경우 수소에 의한 어떠한 효과가 나타나는지를 알아본다.

3. 결과 및 고찰

3.1 침투 수소량 및 수소농도분포

1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강에서의 수소량을 Hydrogen Determinator로 측정된 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 두 재료 모두 침투시간에 비례하여 수소량이 증가됨을 알 수 있으며, 2.25Cr-1Mo강에 비하여 1.25Cr-0.5Mo강에 다소 많은 양의 수소가 침투되었다. 판재형상의 시험편 내부로 침투된 수소량과 수소농도의 분포를 구하기 위하여 아래의 2차원 확산 방정식을 이용하였다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \left(\frac{\partial^2 C}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 C}{\partial y^2} \right) \quad (1)$$

여기서 C는 수소의 농도이고, x-y평면은 시험편의 단면(3×6mm)과 일치한다. D는 재료의 확산계수(diffusion coefficient)이며 1.25Cr-0.5Mo강의 확산계수는 $0.957 \times 10^{-4} (\text{mm}^2/\text{sec})$,⁽⁸⁾ 2.25Cr-1Mo강의 확산계수는 $0.853 \times 10^{-4} (\text{mm}^2/\text{sec})$ ⁽⁹⁾로 하였다. 시험편 내부의 수소농도(C)는 아래의 식 (2)와 같이 표현된다.

$$C = C_b \left[1 - \sum_m \sum_n \frac{64}{(2m-1)^2 (2n-1)^2 \pi^4} \cdot e^{-D \left[\left(\frac{2m-1}{2L_1} \right)^2 + \left(\frac{2n-1}{2L_2} \right)^2 \right] \pi^2 t} \right] \quad (2)$$

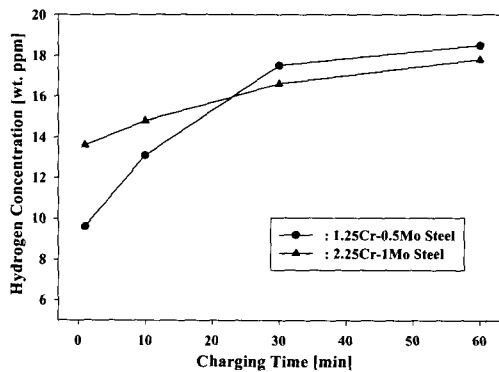


Fig. 1 Hydrogen amount charged in steels

여기서 L_1 과 L_2 는 시험편의 모서리 길이를 표시한다. 시험편 표면에서의 수소농도(C_b)가 일정한 값이라는 경계조건으로부터 수소농도의 이론해를 구할 수 있으나, 먼저 시험편 표면의 수소농도를 알아야 한다. 2.25Cr-1Mo강인 재료에 대하여 식 (2)를 무차원량(C/C_b)으로 계산하고, 그 결과를 Fig. 1에서 나타낸 침투 수소량과 비교하여 가장 근사한 값($C_b=41.6\text{ppm}$)을 시험편 표면의 수소농도값으로 결정하였다.

Fig. 2는 수소취화에 대한 유한요소해석의 신뢰성 평가를 위하여 식 (2)에서 계산한 결과와 판재형상의 시험편을 모델링하여 유한요소법으로 구한 수소농도를 비교하여 나타내었다. 그 결과 이론해로 구한 값과 서로 잘 일치하므로 유한요소법에 의한 수소취화 연구는 신뢰성이 있다고 평가되어진다. 따라서 노치를 가진 환봉 인장 시험편에 대한 수소 농도 분포를 구하기 위하여 ABAQUS를 사용하여 해석하였으며, 이 때 재료의 확산계수와 시험편 표면의 수소농도는 이론적 해석에서 사용한 것과 동일한 값으로 하였다.

노치 형상과 크기는 인장시험에서 사용한 것과 동일하게 하여 수소 농도 분포와 기계적성질의 상관관계를 고찰하고자 하였다. Fig. 3은 침투시간이 60분, 노치 깊이가 0.838mm, 재료가 2.25Cr-1Mo강인 환봉 인장 시험편을 모델링하여 시험편 내부로 침투하여 확산된 수소농도분포를 나타낸 것이다. 시험편의 노치 끝 부분과 평활 부분에 대하여 반지름 방향으로 수소가 침투한 양을 비교하였을 때 평활 부분의 침투량이 다소 많음을 알 수 있었다.

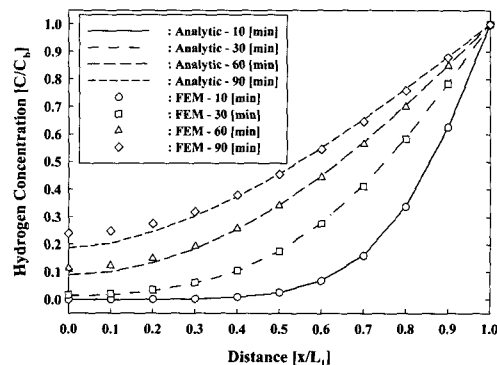


Fig. 2 The comparison between Analytic and FEM results in plate type specimen ($y=0$ plane)

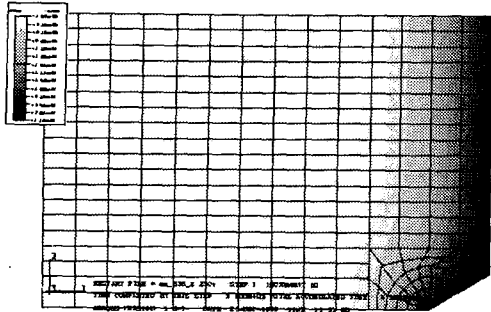


Fig. 3 The result of finite element analysis

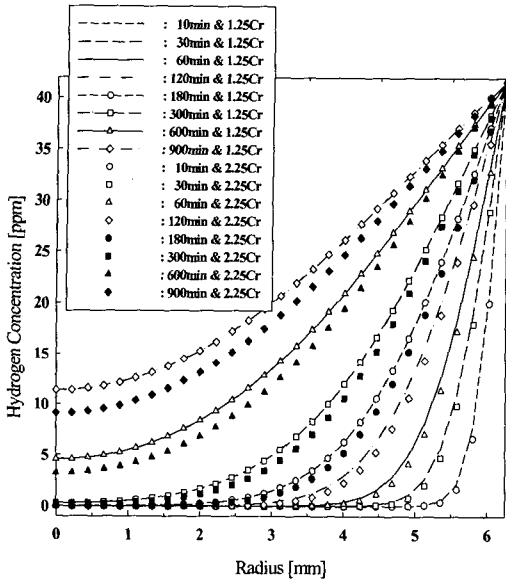


Fig. 4 The distribution of hydrogen concentration of 1.25Cr-0.5Mo steel and 2.25Cr-1Mo steel

Fig. 4는 노치가 없는 환봉 인장 시험편의 내부로 침투한 수소농도분포를 반지름 방향에 따라 나타낸 것이다. 침투시간 초기에는 비교적 빠른 속도로 확산하여 많은 양의 수소가 침투되고 있으나 시간이 경과함에 따라 완만하게 증가하였고, 수소농도분포에 있어서 시험편 표면에서 중심으로 갈수록 농도가 급격하게 감소되는 것을 보여 주고 있다. 본 연구에서 사용한 두 가지 재료를 비교하였을 때 1.25Cr-0.5Mo강이 2.25Cr-1Mo강에 비하여 다소 빠르게 확산하여 침투하는 것을 알 수 있었다.

Fig. 5는 재료가 2.25Cr-1Mo강인 경우에 대하여

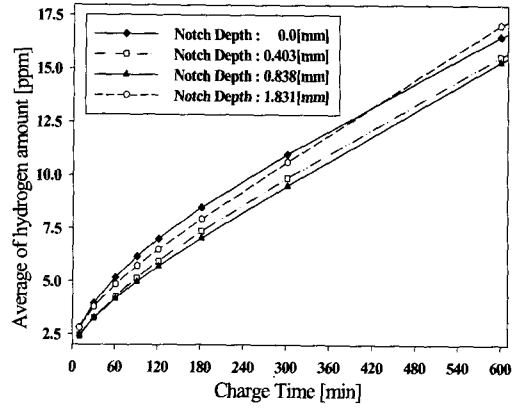


Fig. 5 Mean value for hydrogen amount of 2.25Cr-1Mo steel with the different notch sizes

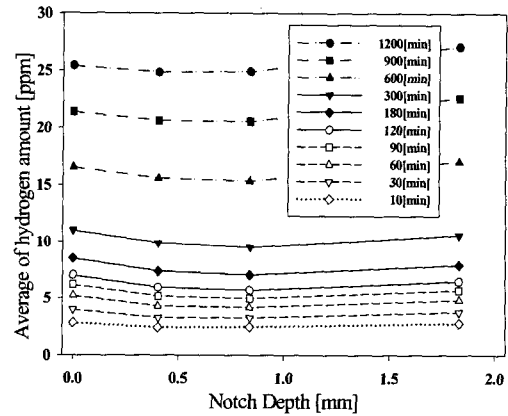


Fig. 6 Mean value for hydrogen amount of 2.25Cr-1Mo steel at each charging time

노치 끝 부분에서 중심까지 분포된 수소농도의 평균값을 노치 크기에 따라 나타낸 것이다. 시험편 내부로 침투한 평균 수소량은 노치가 없는 경우가 일정 시간까지는 가장 많았으며, 노치 깊이가 0.403mm인 경우 초기에는 가장 적었으나 시간이 경과함에 따라 점차적으로 증가하여 노치 깊이가 0.838mm인 경우보다 더 많은 수소가 침투되었다.

전체적으로 취화시간이 경과함에 따라 비슷한 침투량으로 증가하고 있으나 노치의 크기가 아주 커지면 노치가 없는 경우보다 더 많은 수소가 침투될 것임을 알 수 있었다. Fig. 6에 나타낸 것과 같이 노치를 가진 시험편에 있어서 침투시간 초기에는 노치 깊이에 비례하여 평균 수소량이 증

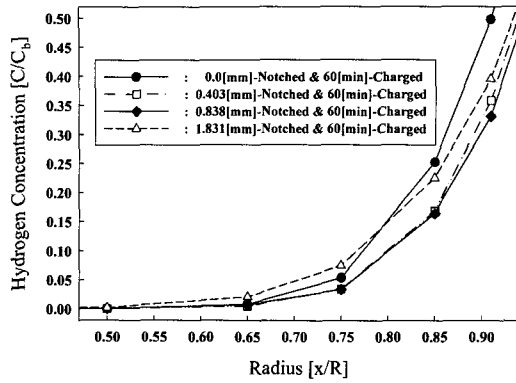


Fig. 7 The distribution of hydrogen concentration with the different notch sizes

가하지만, 시간이 경과함에 따라 노치 깊이가 0.838mm인 곳까지는 감소하였다가 다시 증가되는 현상을 보여주고 있다.

시험편의 재료가 2.25Cr-1Mo강인 경우에 대하여 취화시간을 60분으로 하였을 때, 노치 끝 부분에서 중심까지 반지름 방향에 따른 수소농도분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 5에서 보았듯이 시험편 내부로 침투한 평균 수소량은 노치가 없는 경우가 가장 많았지만, 동일한 취화시간 동안 수소가 시험편 내부로 침투하여 확산된 깊이는 노치 크기가 1.831mm인 경우가 가장 깊었다. 따라서 수소 농도는 노치 깊이가 깊어질수록 시험편의 단면적 전체에 고르게 분포된다는 것을 알 수 있다.

3.2 변형률속도의 영향

변형률속도(strain rate)가 수소취화에 미치는 기계적 성질의 영향을 알아보기 위하여 재료가 1.25Cr-0.5Mo강이고 노치가 없는 환봉 인장시험편을 사용하였다. 수소 침투시간은 10분에서 180분까지 변화시키고, 변형률 속도는 $3.3 \times 10^{-5}[\text{sec}^{-1}]$, $3.3 \times 10^{-4}[\text{sec}^{-1}]$, $1.0 \times 10^{-3}[\text{sec}^{-1}]$ 으로 다르게 하였다. 인장시험을 실시하기 전에 침투된 수소가 외부로 방출되는 것을 고려하여 수소취화 후 즉시 인장시험을 실시하였다.

Fig. 8은 변형률속도와 수소 침투시간(hydrogen charging time)에 대한 인장강도의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 9는 연신율(elongation)의 변화를 나타내고 있다. 변형률 속도가 느릴수록 연신율이 감소하는 현상을 볼 수 있으며, 이것은 강에서

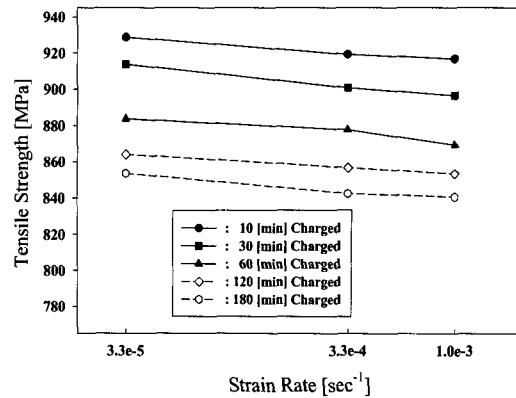


Fig. 8 Tensile strength vs strain rates at each charging time of 1.25Cr-0.5Mo steel

일어날 수 있는 내부가역수소취화(internal reversible hydrogen embrittlement)의 일반적인 특징⁽¹⁰⁾과 잘 일치한다. 즉 변형률속도가 빠를수록 균열의 내부로 수소가 확산하여 수소가스압력을 증가시키는 속도보다 균열의 성장속도가 빨라지므로 균열 내부의 수소가스압력이 감소하고 이것으로 인하여 연신율이 증가하게 된다. 한편 수소 침투시간이 증가할수록 인장강도와 연신율이 감소하는 현상을 보였으며, 특히 연신율의 감소가 더욱 뚜렷하였다. 따라서 변형률속도에 비하여 수소 침투시간의 변화가 수소취화에 대한 기계적 성질의 영향에 더욱 민감하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

Fig. 4에서 보여주는 것과 같이 수소 침투시간 초기(대략 60분)까지는 수소가 빠르게 확산하여 침투하고 있으나 시험편의 표면에 집중되고 있다. 시간이 경과함에 따라 침투되는 수소량은 빠르게 증가하는데 반하여 연신율과 인장강도는 다소 완만하게 변화하고 있다. 이러한 시점에서 시험편 내부로 침투한 평균 수소량은 대략 3~5[ppm] 정도이지만 표면에서 조금 떨어진 곳부터 중심까지 분포된 수소 농도는 매우 적은 양을 보이고 있다. 따라서 미소량의 수소가 재료의 연신율과 인장강도의 변화에 영향을 미칠 수 있음을 보여주고 있다. 또한 여러 가지 성능저하의 요인 가운데 수소취화로 인한 인성과 연성의 감소로 재료가 파손되는 것은 단시간에 일어날 수 있는 현상임을 알 수 있다.

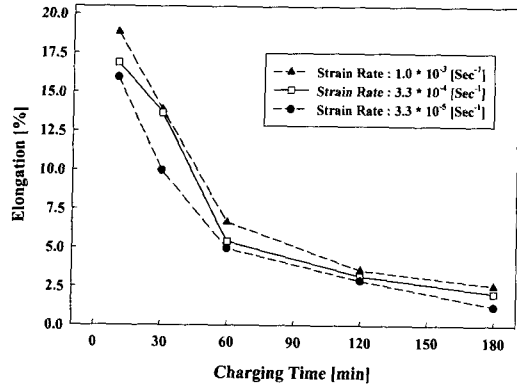


Fig. 9 Elongation vs hydrogen charging time of 1.25Cr-0.5Mo steel with the different strain rates

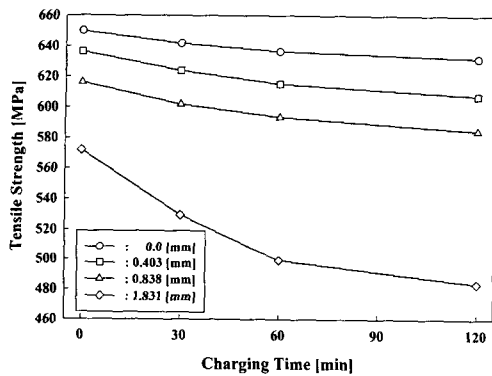


Fig. 10 Tensile strength vs hydrogen charging time of 2.25Cr-1Mo steel with the different notch sizes

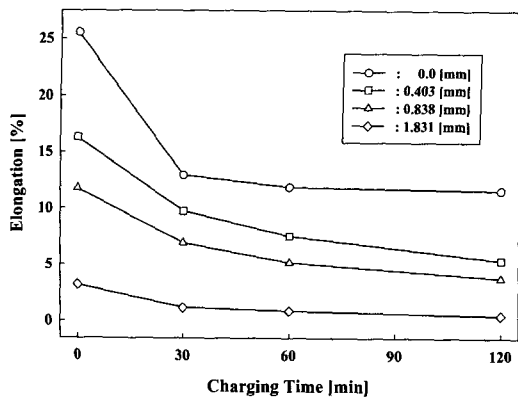


Fig. 11 Elongation vs hydrogen charging time of 2.25Cr-1Mo steel with the different notch sizes

3.3 노치 크기의 영향

노치의 크기가 수소취화에 미치는 영향을 알아보기 위하여 2.25Cr-1Mo강으로 제작한 환봉 인장 시험편을 이용하였다. 변형률 속도를 $3.3 \times 10^{-4} [\text{Sec}^{-1}]$ 로 일정하게 하고 수소 침투시간을 변화시켜 수소취화 정도에 따른 기계적 성질의 변화를 고찰하였다. Fig. 10은 노치 깊이와 수소 침투 시간에 대한 인장강도의 변화를 보여주고 있으며, Fig. 11은 연신율의 변화를 나타내고 있다. 수소 침투시간이 증가함에 따라 인장강도가 감소하였으며, 노치 깊이가 깊어질수록 대체적으로 큰 감소 폭을 보여주고 있다.

Fig. 5와 7에서 보았듯이 노치가 없는 경우에 비하여 시험편 내부로 침투한 평균 수소량은 적었지만 노치가 깊어질수록 노치 끝 부분의 단면적에 비교적 넓게 수소가 분포되고, 노치효과⁽¹¹⁾가 수소취화감수성을 높여주기 때문에 인장강도가 뚜렷하게 변화되었다고 생각된다. 따라서 노치의 크기가 증가할수록 수소취화에 대하여 더욱 민감하게 작용하며 취화의 효과가 두드러지게 나타난 것으로 보여진다.

한편 Fig. 11에서 노치가 없는 경우 침투시간 초기에는 연신율이 큰 폭으로 감소하였으나 시간이 지남에 따라 완만하게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이것과 관련하여 Fig. 9에 나타난 것과 같이 1.25Cr-0.5Mo강인 경우 일정한 시간동안은 침투시간의 증가와 함께 연신율이 큰 폭으로 감소하였으며, 그 값에 있어서도 2.25Cr-1Mo강에 비하여 현저하게 적었다. Fig. 4에 나타난 두 재료 사이의 수소농도 분포와 Fig. 9과 11의 연신율을 고려할 때, 1.25Cr-0.5Mo강이 2.25Cr-1Mo강에 비하여 수소취화에 더욱 민감하게 작용한다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

압력용기의 재료로 사용되고 있는 1.25Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강에 대하여 환봉 인장 시험편 내부로 침투한 수소농도분포를 유한요소법으로 구하고, 노치의 크기를 변화시킨 시험편에 음극전기분해법을 통하여 수소를 침투시킨 뒤 인장 시험을 실시하여 수소취화에 대한 기계적 성질의 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 시험편 내부의 수소농도분포에 있어서 침투

시간 초기에는 빠르게 확산하여 많은 양의 수소가 침투되지만 표면에 집중적으로 분포하고 있으며, 중심방향으로 갈수록 수소농도는 급격하게 감소하였다.

(2) 시험편의 단면적에 분포된 수소농도의 평균 값을 기준으로 하였을 때 노치가 없는 시험편에서 더 많은 수소가 침투되었다. 노치를 가진 경우 노치 깊이에 비례하여 수소량이 증가하지만 일정한 노치 깊이까지는 수소량이 감소하였다가 다시 증가되는 현상이 나타나며, 이러한 현상은 침투시간이 경과함에 따라 더욱 현저하였다.

(3) 1.25Cr-0.5Mo강은 침투시간이 경과함에 따라 연신율과 인장강도가 감소하며, 연신율의 감소 폭과 그 값에 있어서 2.25Cr-1Mo강보다 뚜렷하게 나타나므로 1.25Cr-0.5Mo강이 수소취화에 더 민감하게 작용하였다.

(4) 1.25Cr-0.5Mo강에 있어서 변형률속도가 빠를수록 인장강도는 감소하고 연신율은 증가하였으나, 그 변화 폭에 있어서 침투시간의 경과에 따른 변화보다 적으므로 수소취화에 대한 민감도는 침투시간의 변화가 변형률속도보다 더 높았다.

(5) 노치를 가진 시험편에서 더 적은 양의 수소가 침투되었음에도 불구하고, 기계적 성질의 변화가 뚜렷한 것은 노치효과와 균일한 수소농도분포에 의해 노치를 가진 경우가 수소취화감수성에 더 민감함을 보여주었다.

(6) 기계적 성질의 변화에 심각한 영향을 미칠 수 있는 침투 수소량은 매우 적은 양이며, 이때의 수소량까지 도달되는 침투시간은 초기에 이루어졌다. 따라서 수소취화로 인한 연성과 인성의 저하로 재료가 파손되는 것은 매우 짧은 시간과 소량의 수소에 의해서 일어날 수 있는 현상임이 밝혀졌다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

- (1) Hideki HAGI, 1996, "Hydrogen Embrittlement of Mild Steel Charged Cathodically with Hydrogen," *JSME International Journal*, Vol. 39, No. 2, pp. 246~251.
- (2) Kaori Miyata, and Masaaki Igarashi, 1992, "Effect of Ordering on Susceptibility to Hydrogen Embrittlement of a Ni-Base Super-alloy," *Metall. Tran. A*, Vol. 23A, No. 2, pp. 953~961.
- (3) 이종권, 조종춘, 최병학, 1994, "Hydro-Cracker Piper의 수소 취성 파손," 한국부식학회지, 제23권, 4호, pp. 226~232.
- (4) Symons D. M., 1997, "Hydrogen Embrittlement of Ni-Cr-Fe Alloys," *Metall. and Mat. Trans.*, Vol. 28A, pp. 655~663.
- (5) ASTM E8M-95a, 1995, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]," pp. 77~97.
- (6) 尹大鎬, 成均館大學校 碩士論文, 1983, "Al-Mg合金의 수소취화에 관한 研究," pp. 7~8.
- (7) 권동일, 김학, 이성학, 장영원, 1992, "연화현상에 미치는 수소결합효과의 미세기구," *大韓金屬學會誌*, Vol. 30, No. 10, pp. 1248~1253.
- (8) 김상주, 김철환, 2001, 금속확산론, 청문각, 서울, pp. 5~25.
- (9) Valentini R., and Solina A., 1994, "Influence of microstructure on hydrogen embrittlement behaviour of 2.25Cr-1Mo steel," *Mater. Sci. Eng.*, Vol. 10, pp. 908~914.
- (10) Smialowski M., 1962, *Hydrogen in Metals*, Pergamon Press, pp. 200~257.
- (11) 下川義雄, 1971, *鐵と鋼*, Vol. 57, No. 12, p. 64.